УДК 007:631.2

А.К. ТУГЕНГОЛЬД, В.П. ДИМИТРОВ, Л.В. БОРИСОВА

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОДУКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ МАШИН

Рассматривается структура и взаимосвязи подсистем экспертной системы для технологической регулировки зерноуборочного комбайна. Описываются режимы работы экспертной системы и различные аспекты представления знаний.
Ключевые слова: *нечеткие экспертные знания, экспертная система, технологическая регулировка, зерноуборочный комбайн, лингвистическая переменная.*

Введение. Проблема повышения эффективности сельхозпроизводства во многом связана с качеством функционирования сельскохозяйственной техники, оказывающей решающее влияние на достижение результата и расход ресурсов при проведении уборочных работ [1]. Задача принятия решений при технологической регулировке машины является одной из важнейших: от правильного ее решения зависят эффективность и результативность технологического процесса уборки. Вместе с тем эта задача относится к классу трудноформализуемых [2, 3]. В основном управление технологическим процессом комбайновой уборки возлагается на оператора. Трудности с решением задачи технологической регулировки связаны с неопределенностью информации о показателях качества работы комбайна, факторах внешней среды, в которой функционирует зерноуборочный комбайн, регулируемых параметрах машины, а также сложностью и недостаточной изученностью взаимосвязей между указанными признаками.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности функционирования уборочных машин является разработка систем информационной поддержки (экспертных систем) интеллектуальной деятельности оператора при управлении комбайном.

Специфика задач принятия решений при функционировании зерноуборочных комбайнов состоит в следующем.

1. Для рассматриваемой технической системы адекватное математическое описание процесса принятия решений (ПР) при управлении технологическим процессом в настоящее время отсутствует. Приспособленность зерноуборочных комбайнов к регулировке недостаточна. По-прежнему преобладают органолептические методы диагностирования.

2. Наиболее сложным видом деятельности человека в системе «оператор-комбайн-внешняя среда» является принятие решений. При этом информационная нагрузка на оператора в значительной степени обуславливает производительность и качество работы данной системы. Задачи технологической регулировки рабочих органов комбайна являются достаточно трудными, и их оптимальное решение требует высококвалифицированных специалистов (экспертов), количество которых не соответствует практическим потребностям.

3. Имеющиеся аналитические и корреляционно-регрессионные модели представляют собой достаточно громоздкие математические

конструкции, и их использование в реальном времени и в сложных практических условиях затруднено.

Архитектура и режимы работы экспертной системы. Особенности предметной области определили архитектуру экспертной системы и ее место во взаимодействии с человекомашинной системой (рис.1). Для удобства рассмотрения и анализа выделены укрупненные блоки: ЭС, ИО, АТС, ЧМС, ВС.

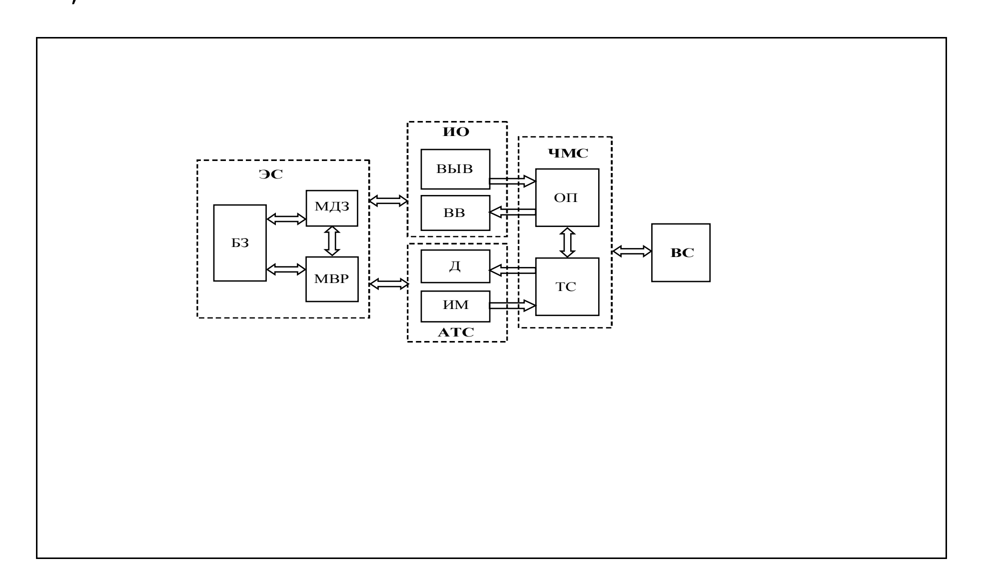


Рис.1. Многоуровневая структура использования экспертной системы: ЭС – экспертная система; БЗ – база знаний; МДЗ – модуль дополнения знаний; МВР – модуль вывода решений (механизм вывода); ИО – интерфейс оператора (лица, принимающего решения – ЛПР); ВЫВ – средства вывода информации; ВВ – средства ввода информации; АТС – адаптер технической системы; Д – датчики; ИМ – исполнительные механизмы; ЧМС – человекомашинная система; ОП – оператор (ЛПР); ТС – техническая система (комбайн); ВС – внешняя среда

Традиционными компонентами ЭС являются база знаний, модуль вывода решений («машина вывода»), модуль дополнения знаний, интерфейс оператора. Для управления техническим состоянием и функционированием машины (технической системы) рассматриваются дополнительные модули: Д – чувствительные элементы (датчики) и ИМ – исполнительные механизмы, которые условно объединены в модуль АТС – адаптер технической системы. Модуль Д предназначен для получения значений выходных характеристик ТС и значений факторов ВС. Для выдачи корректирующих воздействий на ТС предусмотрен модуль ИМ.

Характер взаимодействия модулей ОП – ИО в основном аналогичен взаимодействию модулей ТС – АТС. Модуль ИО включает средства ввода и вывода необходимой информации для оператора. И в том и в другом случае имеются замыкающиеся через ЭС контуры: ОП $\rightarrow$ВВ $\rightarrow$ЭС$\rightarrow$ ВЫВ$\rightarrow$ ОП; ТС$\rightarrow$ Д$\rightarrow$ ЭС$\rightarrow$ ИМ$\rightarrow$ ТС.

Модуль МДЗ предназначен для выполнения стандартных функций: дополнения, удаления, редактирования знаний. Модуль МВР предназначен для реализации стратегий управления (использования) знаниями и выработке решений (корректирующих действий). Оба контура обеспечивают

процессы выявления и обработки информации о состоянии факторов уборки, параметров технического состояния, регулируемых параметров и показателей качества, а также выработки управляющих воздействий.

В зависимости от возможности практической реализации рассматриваемой архитектуры экспертной системы могут использоваться контуры:

$$ВС\rightarrow ОП\rightarrow ТС\rightarrow ВС, \quad (1)$$

$$ВС\rightarrow ОП\rightarrow ЭС\rightarrow ОП\rightarrow ТС\rightarrow ВС, \quad (2)$$

$$ВС\rightarrow ТС\rightarrow АТС\rightarrow ЭС\rightarrow АТС\rightarrow ТС\rightarrow ВС. \quad (3)$$

Контур (1) соответствует традиционному режиму управления машиной (ТС), то есть без использования экспертной системы.

Контур (2) соответствует режиму «советчика» оператору. В этом режиме ЭС выступает как система поддержки принятия решений. В базе знаний аккумулированы многочисленные стандартные решения практических задач, а оператор выполняет функции АТС. В этом случае решения, формулируемые ЭС по управлению техническим состоянием или технологическим процессом, носят рекомендательный характер. Оператор учитывает рекомендации экспертной системы, но самостоятельно обеспечивает работоспособность и функционирование ЧМС: принимает решения по выработке управляющих воздействий (с привлечением дополнительной информации и здравого смысла) и осуществляет эти действия. Оператор выполняет функции интеллектуального звена в системе управления ЧМС, и ЭС служит для снижения информационной нагрузки на оператора, так как эта нагрузка велика из-за сложности конструкции машины, насыщения ее электроникой, гидравликой, а также сложных (разнообразных) условий уборки.

Контур (3) соответствует автоматическому режиму работы ТС.

В данной статье мы не рассматриваем контуры (1) и (3) из-за их характерных особенностей, а более подробно проанализируем использование контура (2). Для обеспечения эффективного функционирования ЧМС целесообразно выделить подпроцессы работы ЭС: НЗ – наполнение знаниями; АД – адаптация; АН – автономная настройка; СРР – советующий режим работы; АРР – автоматический режим работы (рис.2).

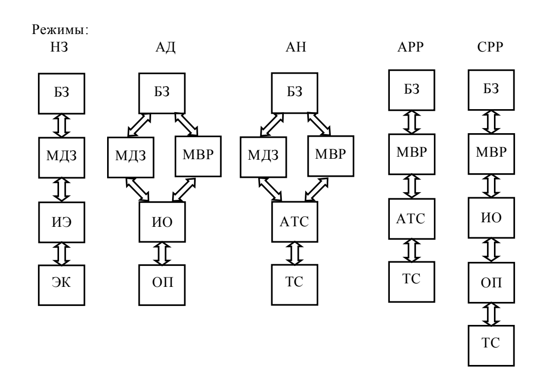


Рис.2. Режимы работы экспертной системы

Режим НЗ соответствует формированию (заполнению) базы знаний экспертной системы с «нуля» и осуществляется предметными экспертами (совместно с инженером знаний с помощью ИЭ – интерфейса эксперта). В данном случае допускаем, что оператор использует коммерческий вариант экспертной системы с сформированной базой знаний.

Режим АД соответствует корректировке базы знаний оператором (ЛПР) в период эксплуатации (корректировка «под себя»). Такая корректировка необходима при изменении внешних условий (например, изменения в конструкции машины), появлению описания новых стандартных решений уникальных задач (например, уборка зерновых в условиях повышенной влажности).

Режим СРР соответствует отлаженному состоянию при штатной эксплуатации экспертной системы. Особенностью рассматриваемой предметной области является то обстоятельство, что в связи объективными условиями изменчивости условий уборки задачи технологической настройки и корректировки технологических регулировок необходимо решать минимум 2-4 раза в течение одного дня [1].

При реализации интегрированной системы автоматического управления комбайном в режиме АРР автоматически решаются рассматриваемые задачи при штатной эксплуатации ТС (проведении уборочных работ).

Представление нечетких знаний. Представление знаний предметной области есть описание в рамках определенной модели признаков и отношений между ними. Ранее нами была показана целесообразность использования лингвистического описания нечетких экспертных знаний [4, 5]. Для сужения области анализа проблемы рассмотрим семантические пространства факторов внешней среды (условий уборки) и регулируемых параметров машины в задаче технологической настройки комбайна.

В базе знаний экспертные знания хранятся в виде лингвистических переменных (ЛП) и наборов так называемых решающих правил. Лингвистические переменные содержат наборы описания рассматриваемых семантических пространств. Решающие правила осуществляют логический вывод на основе композиции заложенных в базе знаний высказываний.

Факторы внешней среды и регулируемые параметры описываются ЛП, каждая из которых состоит из термов:

$$A_i:\{a_{i1},\dots, a_{i2},\dots, a_{ip},\dots, a_{ik}\}, \quad (4)$$

$$B_i:\{b_{j1},\dots, b_{j2},\dots, b_{jp},\dots, b_{jk}\}. \quad (5)$$

В выражениях (4), (5) первый индекс – номер признака, второй – номер терма. Термы представляют собой наборы значений (профили) функций принадлежности (ФП), определенных на множествах значений соответствующих признаков и принимающие значения на интервале [0,1]:

$$a_{ip} = \mu_{ip}(A_i),$$

$$b_{jq} = \mu_{jq}(B_j); \qquad \mu_{ip}(A_i), \mu_{jq}(B_j) \quad [0,1].$$

Профили ФП представляют собой часть экспертных знаний и хранятся в базе знаний. Конфигурация профилей функций принадлежности строятся разработчиком (инженером знаний) экспертной системы на основе результатов взаимодействия с экспертом. При этом могут использоваться различные подходы: интервьюирование одного эксперта-человека (метод деления функции принадлежности пополам), использование метода экспертной оценки (учитываются суждения нескольких экспертов), косвен-

ный метод построения функции принадлежности (метод анализа иерархий) и др. Важным является то обстоятельство, чтобы профили имели унифицированный вид, т.е. характеризовались фиксированным набором параметров *р*. В нашем случае для описания крайнего левого терма используется выражение (6), для центральных термов – (7), для крайнего правого – (8) [6, 7]:

$$\mu(x,a,b) = \begin{cases} 1, если & x \le a \\ \dfrac{b-x}{b-a}, если & a \le x \le b \\ 0, если & x \ge b \end{cases} \qquad (6)$$

$$\mu(x,a,b,c) = \begin{cases} 0, если & x \le a \\ \dfrac{x-a}{c-a}, если & a \le x \le c \\ \dfrac{b-x}{b-c}, если & c \le x \le b \\ 0, если & x \ge b \end{cases} \qquad (7)$$

$$\mu(x,a,b) = \begin{cases} 0, если & x \le a \\ \dfrac{x-a}{b-a}, если & a \le x \le b \\ 1, если & x \ge b. \end{cases} \qquad (8)$$

Терм-множества рассматриваемых ЛП переменных удовлетворяют необходимым условиям [6]. Предполагается использование нормальных нечетких множеств с высотой d = 1. Ранее нами было показано, что достаточно рассматривать не более трех термов, как для факторов внешней среды, так и для регулируемых параметров машины [8].

Отношения между входными и выходными признаками (факторами внешней среды, параметрами технического состояния и регулируемыми параметрами машины) описываются в виде системы высказываний и содержатся в базе знаний в виде системы решающих правил (РП).

Специфика изучаемой предметной области предполагает применение систем нечетких высказываний типа [9]:

$$\tilde{L}^{(1)} = \begin{cases} \tilde{L}^{(1)}_{1}: если < E_{11}\ то\ \tilde{\alpha}_1,\ B\ \tilde{\ }_1 >, \\ \tilde{L}^{(1)}_{2}: если < E_{21}\ то\ \tilde{\alpha}_2,\ B\ \tilde{\ }_2 >, \\ \tilde{L}^{(1)}_{3}: если < E_{31}\ то\ \tilde{\alpha}_3,\ B\ \tilde{\ }_3 >, \\ \ldots \end{cases} \qquad (9)$$

E_{ji}, $i = \overline{1,n_j}$, $j = \overline{1,m}$ – высказывания вида

$$< \beta_X\ есть\ \alpha_{X_{ji}}\ И\ \beta_Y\ есть\ \alpha_{Y_{ji}}\ И \ldots И\ \beta_Z\ есть\ \alpha_{Z_{ji}} > .$$

где x, y, z и т.д. – факторы внешней среды; m – число базовых значений выходной лингвистической переменной.

Высказывание E_{ji} представляет собой i-ю входную нечеткую ситуацию, которая может иметь место, если лингвистическая переменная β_V примет значение α_{Vj}. Значения α_{Xji}, α_{Yji}, α_{Zji}, …, α_{Vj} – нечеткие переменные.

Нечеткие высказывания соответствуют общей форме

$$\tilde{A}_j = <\beta_W \text{ есть } \alpha_{W_j}> \text{ и } \tilde{B}_j = <\beta_V \text{ есть } \alpha_{V_j}> \qquad (10)$$

и выглядят для описания лингвистической переменной одного из регулируемых параметров, например, «частота вращения молотильного барабана»: {пониженная, номинальная, повышенная}, следующим образом:

$$\tilde{A}_1 = <\beta_W \text{ есть } \alpha_{W_1} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_3} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_8} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_{10}}>$$

$$\tilde{A}_2 = <\beta_W \text{ есть } \alpha_{W_2} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_4} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_9}>$$

$$\tilde{A}_3 = <\beta_W \text{ есть } \alpha_{W_5} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_6} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_7} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_{11}} \text{ или } \beta_W \text{ есть } \alpha_{W_{12}}>$$

$$\tilde{B}_1 = <\beta_V \text{ есть } \alpha_{V_1}>$$

$$\tilde{B}_2 = <\beta_V \text{ есть } \alpha_{V_2}>$$

$$\tilde{B}_3 = <\beta_V \text{ есть } \alpha_{V_3}>,$$

где $\alpha_{V_1}, \alpha_{V_2}, \alpha_{V_3}$ – соответствующие значения термов выходной лингвистической переменной.

В этом случае система нечетких высказываний имеет вид:

$$\tilde{L}^{(1)} = \begin{cases} \tilde{L}_1^{(1)}: \text{если} < \tilde{A}_1, \text{ то } \tilde{B}_1 > \\ \tilde{L}_2^{(1)}: \text{если} < \tilde{A}_2, \text{ то } \tilde{B}_2 > \\ \tilde{L}_3^{(1)}: \text{если} < \tilde{A}_3, \text{ то } \tilde{B}_3 > . \end{cases} \qquad (11)$$

Система нечетких высказываний лингвистически неизбыточна при выполнении условия:

$$(\forall\, i, j \in \overline{1,m})[\tilde{A} \& \tilde{B} = \tilde{B} \to i = j].$$

Если β_W и β_V – входная и выходная лингвистические переменные процесса принятия решения с множеством базовых значений T_W и T_V, то система нечетких высказываний является лингвистически полной при выполнении условия [9]

$$(\forall\, \alpha_W \in T_W)[\exists\, i \in \overline{1,m}) \,|\, \tilde{L}_i^{(1)}:$$

$$< \text{ЕСЛИ } \tilde{A}_i \text{ ТО } \tilde{B}_i > \& \tilde{A}_i :< \beta_W \text{ есть } \alpha_W >],$$

в противном случае система является лингвистически вырожденной.

Система нечетких высказываний является лингвистически непротиворечивой при выполнении условия:

$$(\forall\, i, j \quad \overline{1,m})[\tilde{A}_i = \tilde{A}_j \rightarrow \tilde{B}_i = \tilde{B}_j].$$

Если T ($\tilde{L}_i / \tilde{L}_j$), i = 1, m, истинность высказывания $\tilde{L}_i$ относительно $\tilde{L}_j$, то непротиворечивостью нечеткой системы L является величина T_L, определяемая выражением [9]:

$$T_L = \underset{i=\overline{1,m}}{\&} \quad \underset{j=\overline{1,m}.}{\&} \quad T(\tilde{L}_i / \tilde{L}_j), \quad i \quad j.$$

Формально эта величина будет иметь вид

$$T_L = \{< \mu_{TL}(\tau), \tau >\},$$

$$(\forall\, \tau \quad [0,1])[\mu_T(\tau) = \min_{i,j=\overline{1,m}} \mu_{T_{ij}}(\tau).$$

,

где m – число высказываний в системе $\tilde{L}$; $|T_V|$ – число базовых значений выходной лингвистической переменной T_V (число выходных нечетких ситуаций); μ_{Tij} (τ) – функция принадлежности степени истинности высказывания L_i относительно $\tilde{L}_j$, отражающая количественную меру соответствия, в то время как лингвистическая непротиворечивость определяет качественную меру соответствия нечетких экспертных высказываний относительно друг друга.

Рассматриваемая система (11) лингвистически полная, неизбыточная, невырожденная и непротиворечивая нечеткая система экспертных высказываний, и для нее справедливо равенство $|T_V|$ = m.

Экспертные высказывания, отражающие нечеткие ситуации и характеризующие возможные состояния регулируемого параметра, например, частоты вращения молотильного барабана, а именно ситуации пониженной, номинальной и повышенной частоты вращения (обозначены соответственно индексами 1, 2, и 3) в лингвистическом и символьном выражении имеют вид (фрагмент):

$E_{1.3}$:<β_X есть α_{X1} и β_Z есть α_{Z1} и β_Y есть α_{Y1} и β_Q есть α_{Q2}>

$E_{1.3}$: ЕСЛИ урожайность «менее 30» И засоренность «малая»

И соломистость «нормальная» И влажность хлебостоя «сухой».

Видно, что для полного описания-указания реакции ЭС при всех возможных комбинациях термов входных переменных требуется не более mk^n решающих правил.

Как отмечалось выше, ЭС с фиксированным набором знаний реализует функции СППР. При этом режим НЗ вынесен в этап разработки. Именно на этом этапе проектирования ЭС определяются лингвистические переменные и их профили, формулируются решающие правила. В данной работе вопрос функционирования режима НЗ без участия эксперта не рассматривается ввиду его сложности реализации.

Кроме СРР нечеткая алгоритмическая часть имеется в режиме АД, который включает корректировку экспертных знаний с участием оператора (ЛПР). В режиме автоматической подстройки предполагается автоматическое согласование корректировки с ранее полученными знаниями. В этом случае интерфейс оператора должен быть организован таким образом, чтобы понятия, с которыми работает оператор, были сформулированы в

терминах предметной области. Рассмотрим некоторые аспекты организации режима АД, для случая корректировки ЛП, удовлетворяющих рассматриваемому требованию.

Каждый терм ЛП (значений ЛП) представляет собой профили функции принадлежности, имеющие унифицированный вид (выражения (6)-(8)) и характеризующиеся набором параметров p. Тогда полагаем, что имеется (m+n)kp-параметров, полностью описывающих набор лингвистических переменных предметной области.

Традиционная последовательная схема программной реализации нечетких операций предполагает хранение значений ФП в виде массивов чисел. Процедура обработки включает поэлементный перебор массивов.

Заключение. Ключевое преимущество построения экспертной системы на основе логико-лингвистического представления нечетких экспертных знаний заключается в компактном и адекватном представлении реальных ситуаций функционирования уборочных машин. На основе единого формализма имеется возможность учета количественных и лингвистических признаков внешней среды, параметров технического состояния и регулируемых параметров машины.

На программные системы и базы данных по предварительной настройке и корректировке технологических регулировок зерноуборочных комбайнов получено 7 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ и баз данных в Роспатенте. Применение исследовательского прототипа экспертной системы в полевых условиях позволяет решать задачу управления технологическим процессом при наличии операторов низкой квалификации с учетом меняющихся факторов внешней среды, а также способствует снижению времени на технологическую регулировку в 2-5 раз по сравнению с традиционными методами.

Библиографический список

1. *Пугачев А.Н.* Советы комбайнеру / А.Н.Пугачев. – М.: Колос, 1984. – 224 с.

2. *Борисова Л.В.* Методика моделирования предметной области «технологическая настройка» в нечеткой постановке / Л.В.Борисова //Доклады РАСХН. – 2005. – №6. – С. 62-65.

3. *Тугенгольд А.К.* Интеллектуальное управление технологическими объектами /А.К. Тугенгольд // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Сер. Техн. науки. – 2005. – С. 50-54.

4. *Димитров В.П.* Теоретические и прикладные аспекты разработки экспертных систем для технического обслуживания машин/ В.П.Димитров, Л.В.Борисова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. – 2007. – 202 с.

5. *Димитров В.П.* Нечеткие модели в задачах технологической регулировки машин/ В.П.Димитров, Л.В.Борисова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 224 с.

6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун, В.Б. Силов, В.Б. Тарасов; под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

7. *Борисова Л.В.* Особенности формализации знаний при логико-лингвистическом описании сложных технических систем / Л.В. Борисова, В.П.Димитров / РГАСХМ. – Ростов н/Д. – 2006. – 234 с.

8. *Димитров В.П.* Выбор оптимального числа термов лингвистической переменной / В.П.Димитров, Л.В.Борисова // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр. Всерос. конф. – Воронеж: ГОУВПО ВГТУ, 2007. – С. 118-122.
9. *Малышев Н.Г.* Нечеткие модели для экспертных систем в САПР / Н.Г.Малышев, Л.С.Берштейн, А.В.Боженюк. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.

Материал поступил в редакцию 08.07.08.

A.K. TUGENGOLD, V.P. DIMITROV, L.V. BORISOVA

TO THE QUESTION OF FUZZY EXPERT SYSTEM CONSTRUCTING PRODUCTION TYPE FOR TECHNOLOGICAL ADJUSTMENT OF MACHINES

The structure and interrelations of subsystems of expert system for of a combine's harvester technological adjustment is considered. expert system's operating modes and various aspects of representation of knowledge are described.

ТУГЕНГОЛЬД Андрей Кириллович (р.1937), доктор технических наук (1983), профессор ДГТУ. Окончил РИСХМ (1960).
Сфера научных интересов: интеллектуальное управление технологическими системами, динамика и точность мехатронных систем.
Автор более 200 научных работ, в том числе 18 учебных пособий и монографий.

ДИМИТРОВ Валерий Петрович (р.1953), доктор технических наук (2002), профессор ДГТУ. Окончил РИСХМ (1975).
Сфера научных интересов: системы информационного обеспечения жизненного цикла продукции, экспертные системы, техническое обслуживание машин.
Имеет 307 научных публикаций, в том числе 27 учебных пособий и монографий.

БОРИСОВА Людмила Викторовна, доктор технических наук (2008), профессор. Окончила РГАСХМ (1991).
Сфера научных интересов: статистика, системы информационного обеспечения жизненного цикла продукции, менеджмент качества.
Автор 175 научных работ, в том числе 11 учебных пособий и монографий.